

# AE 시험을 이용한 in-situ stress의 크기와 방향성 결정 연구에 관한 고찰

최영철<sup>1)\*</sup> · 장현식<sup>1)</sup> · 장보안<sup>1)</sup>

## 1. 서론

지하구조물 안정성에 영향을 미치는 응력 집중도는 구조물 주변에 작용하는 현장 초기응력의 크기와 구조물의 형상 등에 따라 달라지기 때문에 지하구조물을 설계하거나 안정성을 평가할 때 초기 응력은 중요한 변수로 작용한다.

이러한 초기응력의 측정 방법에는 크게 수압파쇄법, 응력해방법(Overcoring Method), ASR 방법(Anelastic Strain Recovery Method), AE방법(Acoustic Emission Method)이 있다. 이 중 수압파쇄법은 국내에서 가장 많이 이용되는 방법이지만, 현장 암반을 대상으로 하기 때문에 많은 시간과 비용이 소요된다. 반면, AE 방법은 실내시험이므로 시간과 비용이 적게 소요되며, 간편히 수행할 수 있다.

AE방법은 시료 손상으로 발생하는 탄성파인 AE(acoustic emission)을 측정하여, AE변수인 타격음(hit) 방출횟수(count), 에너지(energy), 진폭(amplitude), 지속시간(duration), 오름시간(risetime) 등을 얻는 것을 말한다. 이 방법은 과거 받은 최대하중을 넘어설 때 AE가 급격히 발생하는 현상(Kaiser, 1950)을 이용하는 것으로, 초기응력 측정에 유용한 방법이며, 주로 사용되는 변수들은 방출횟수와 에너지로 알려져 있다(Bassim, 1992). 앞서 많은 연구로부터 다양한 암석에서 초기응력을 측정할 수 있다는 것이 검증되었지만(Seto, et al., 1999; Lavrov, 2001; Shkuratinik et al., 2006; 박배환, 2001), 현재까지 AE 방법으로 수압파쇄법과 같이 주응력의 방향성과 크기 결정에 관련된 연구는 많지 않다.

최근, *Villaescusa et al.*(2002, 2003)은 응력의 크기만 측정하던 과거와 다르게, 방향성이 표시된 코어로부터 AE 시험을 하여 초기응력 측정뿐만 아니라 주응력의 방향도 결정하였으며, *Yamamoto et al.*(1990)이 제안한 DRA방법을 병행하여 AE 급등점 선택의 객관성을 높였다. 최종적으로 AE 및 DRA 결과를 응력 해방법인 CSIRO HI Cell 방법과 비교하여 일치함을 보였다.

본 연구에서는 *Villaescusa et al.*(2002, 2003)의 연구를 검증하기 위해서 부산대학교 양산캠퍼스 내 시험공에서 채취한 방향성이 표시된 코어를 획득하여 시험하였다. 6개의 응력텐서를 결정하기 위해서는 최소 6개 이상의 방향성이 다른 시료의 응력 값이 필요하기 때문에, 이 연구에서는 9개 방향으로 방향성 있는 코어를 재시추(overcoring)하여 AE 및 DRA시험을 후 초기 응력의 크기와 방향성의 결과를 수압파쇄 결과와 비교, 분석하였다.

## 2. 연구방법

지하에 작용하는 응력을 3차원적 표현하기 위한 응력텐서는 총 9개이지만, 전단응력의 공역 법칙(the law of shears in pairs)에 의해서 6개의 요소만 남는다. 따라서, 임의의 면에 수직으로 작용하는 응력( $\sigma_n$ )은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(James and William, 1978).

$$\sigma_n = l_x^2 \sigma_x + l_y^2 \sigma_y + l_z^2 \sigma_z + 2l_x l_y \tau_{xy} + 2l_y l_z \tau_{yz} + 2l_z l_x \tau_{zx}$$

주요어 : 미소파괴음, AE, DRA, 수압파쇄법, 주응력, 응력텐서

1) 강원대학교 지구물리학과

위 식에서  $l_x, l_y, l_z$ 는 방향코사인이며, 이론적으로 최소 6개의 수직응력인  $\sigma_n$ 을 알고 있다면,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 의 응력텐서를 결정할 수 있다. 즉, 방향코사인은 재시추 하는 방향으로 쉽게 계산가능하며,  $\sigma_n$ 은 AE와 DRA로 얻어지는 결과이므로 6개의 미지수를 구해낼 수 있다. 하지만, 현실적으로 측정값과 이론값은 차이가 있어 근사해를 도출하기 위해서는 다수의(최소 6개)  $\sigma_n$ 이 필요하다.

본 연구에서는 9방향의  $\sigma_n$ 을 사용하였으며, 각 방향마다의 응력 편차를 줄이기 위해 동일한 방향에서 3회의 AE 및 DRA 실험을 수행하였다. AE 시험 후 급등점 선택에 있어 주관적 요소를 배제하기 위해서 DRA는 보충 하기위해서 활용하는 것이 일반적이므로 본 연구도 AE의 보조수단으로 DRA를 사용하였다. AE와 DRA의 시험 결과를 분석한 그래프의 급등점과 변곡점으로부터 총 27개의  $\sigma_n$ 을 결정하였다. 모든  $\sigma_n$ 으로 가능한 응력텐서를 계산해내고, 이에 따른 주응력의 방향과 크기를 도출하였다. 마지막으로 수압과쇄법에 의한 주응력의 방향성과 크기와 비교, 분석하였다. 앞서 내용은 다음과 같은 기본적인 두 가지 가정을 내포하고 있다 (Villaescusa et al., 2003).

1. 과거 받은 응력의 텐서와 일치하는 방향으로 미세균열들이 잘 발달한다.
2. 삼축 압축 상태에서 과거 최대 응력을 받았던 시료도 일축 압축 시험을 통해서 카이저 효과를 결정할 수 있다.

본 연구에서 사용된 암석시료는 경상남도 양산시 물금읍 부산대 양산 캠퍼스 부지의 시추되었으 며, 암종은 조립질 화강암이다. 이 시료는 채취 당시 방향성(북쪽)을 표시하였기 때문에 초기응력의 크기 및 방향성 연구에 적합하다.

성형 시 시료의 직경이 4.71~4.75cm 정도이므로 ISRM에서 제안된 일축 시험 기준치인 길이 대 직경 비를 2:1을 만족시키기 위해서 직경 2cm 코어 비트를 사용하여 재시추 하였다. 재시추된 방향은 시료 축을 기준으로 수평방향 4방향, 경사 4방향, 수직 1방향으로 재시추 하였다. 또한, 각 방향마다의 편차를 줄이기 위해서 3개의 시료를 성형하였기 때문에, 한 심도에서 시료의 개수는 총 27개이다. 시료의 직각도와 편평도 또한 ISRM의 기준치에 적합하게 성형하였다.

시료에 한 쌍의 AE센서를 부착시키고 LVDT(혹은 스트레인 게이지)를 설치하였으며, 3번의 가압과정을 거쳐 자료를 획득하였다. AE 센서의 경우 부착정도나 시험환경 등에 매우 민감하므로 시험 전 모니터링을 통하여 잡음이나 신호 상태를 분석하여 검출한계 등을 조정하는 것이 필요하다. 하중속도는 10MPa/min으로 일정하게 가압했으며, 최고 하중은 상재하중의 2배에서 3배까지 가압하였고, 감압과 가압 사이의 지연시간은 5분을 주었다.

### 3. 연구결과

본 연구에서 AE, DRA시험을 통해서 총 27개의 초기 응력 값을 분석하였다. 이 결과 중에서  $\sigma_n$ 이 동일한 방향에서 편차를 줄이기 위해서 평균에서 편차가 1MPa이상 되는 값은 삭제하고 평균을 계산하였다. 9개의 방향 중 6개의 방향의 값을 임의로 선택하고, 각 방향과 해당하는  $\sigma_n$ 으로 응력텐서를 계산하여 최종적으로 주응력의 크기와 방향성을 결정하였다.

결과 값을 수압과쇄법에 의해 구해진 주응력의 크기와 방향성과 AE, DRA에 의해서 계산된 주응력의 크기와 방향성을 비교하였을 때 상당한 편차를 보이고 있었다. 다른 임의의 6개 방향을 선택한 경우에도 편차가 크며, 임의의 방향에 대한 결과값 상호간의 방향 및 크기 또한

상이하게 도출되었다.

본 연구는 AE, DRA로 결정한  $\sigma_n$ 이 이론상  $\sigma_n$ 과 차이가 적을 경우에도, 주응력의 방향성 및 크기를 결정하는데 문제가 있음을 발견하였다. 따라서, 수압파쇄법에 의한 주응력의 크기와 방향으로 재시추 한 방향에서 이론상의 응력텐서들을 계산하였고, 임의로 오차를 가정하여 주응력의 크기 및 방향의 변화를 분석하였다. 이때 오차범위는 Felicity 비를 참고로  $\pm 5\%$ 로 결정하였다. 여기서 Felicity 비는 'AE의 급등점의 응력과 시료가 이전에 받았던 최대 응력의 비'로 정의 한다. 즉, Felicity 비는 시료의 손상정도를 나타내거나, 초기응력 측정에서는 오차 수준으로 분석한다. 다시 말해서, Felicity 비가 0.9 이상의 값은 '카이저효과'라하며(윤경진, 2002), 초기응력 수준을 잘 기억한다고 분석하므로 10%오차는 AE, DRA로 초기 응력 측정 시 충분히 허용할 수 있는 범위이다. 따라서, 10%보다 작은  $\pm 5\%$  측정오차를 가정하여 마찬가지로 주응력의 크기와 방향을 분석하였으나, 앞서와 같이 방향과 크기의 편차가 크게 분석되었다. 결과적으로, 실제 값에 상당히 정확한  $\sigma_n$ 을 AE, DRA시험으로 예측할 수 있어도 앞서와 같은 3차원적인 응력텐서를 사용하여 주응력의 방향 및 크기를 분석하는 것은 어려운 것으로 판단된다. 본 연구의 목표는 AE, DRA로 주응력을 계산하여 수압파쇄법의 결과와 비교하는 것이었다. 따라서, 수압파쇄법의 가정을 이용하여 문제 해결을 시도하였다. 수압파쇄법의 가정은 '수직응력은 시추공 방향과 평행이며, 일반적으로 상재하중과 동일한 크기를 갖는다는 것과 나머지 두 주응력은 수평응력으로 작용하며, 이들은 서로 수직을 이룬다'는 것이다. 다시 말해서, 수직응력이 상재하중과 동일하므로 수직응력을 고려하지 않고 수평상의  $\sigma_n$ 값을 이용하면 2차원의 평면응력의 문제로 쉽게 분석할 수 있다.

따라서, 3차원 해석에서 수압파쇄법의 결과에 대한 각 방향별 이론적인  $\sigma_n$ 계산하여 임의로 5%오차를 주어 분석한 것과 같이 2차원 해석에서도 적용하였다. 결과는 오차는 실제 응력 방향과  $\pm 10^\circ$ 이며, 최대, 최소 주응력은 각각 약 0.5MPa의 차이를 보인다.

앞서 이론적으로 2차원 문제를 해결하였을 때 오차가 수용할 정도이므로 본 연구는 다시 수평 네 방향의  $\sigma_n$  자료를 이용하여 주응력의 크기와 방향성을 계산하였다. 수압파쇄법에 의한 결과와 비교하였을 때, 상대적으로 수평최대응력은 약 2 MPa 크게, 수평 최소 응력은 약 2 MPa 작게 분석되었으며, 방향성도  $-30^\circ$ 의 오차를 보인다.

#### 4. 결론

본 연구는 *Villaescusa et al.*(2002, 2003)의 연구를 결과를 검증하기 위해서, 부산대학교 내 시추공에서 획득한 시추코어로 AE, DRA시험을 수행하였고, 수압파쇄법에 의해서 얻어진 결과와 비교하였다.

AE, DRA로 측정된  $\sigma_n$ 으로 3차원 응력 텐서를 결정하고, 주응력의 방향 및 크기를 도출한 결과 방향과 크기 모두 상이한 결과를 보였다. 문제점을 분석하기 위해서 수압파쇄법에 의한 이론적인 응력텐서를 계산하고 임의로  $\pm 5\%$  조정하여, 다시 주응력의 크기와 방향을 계산한 결과 역시 상이한 결과를 도출했다.

본 연구는 수압파쇄법과 같이 주응력의 방향과 크기를 결정하는 것이 목표이므로 수압파쇄의 가정을 이용하였고, 결과적으로 2차원 해석이 가능하다. 따라서 앞서와 같이 이론 결과를  $\pm 5\%$  조정하여 다시 분석한 결과 주응력과 방향은 상당히 일치하였다. 따라서 AE, DRA에 의해서 얻어진  $\sigma_n$ 으로 2차원 해석한 결과는 주응력  $\pm 2\text{MPa}$ , 방향은  $-30^\circ$ 의 차이를 보였지만, 방향성과 크기 모두 수압파쇄법의 결과와 상당히 일치한다.

결과적으로 AE, DRA 시험으로 3차원 응력 상태를 결정하기 위해서 수직응력을 상재하중으

로 가정하여 2차원 해석이 필요하다고 판단된다.

- 박배환, 2001, 지연시간과 붕압이 AE와 DRA를 이용한 초기응력 측정에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교, 석사학위논문, 82p.
- 윤경진, 2002, 미소파괴음 측정과 결합입자모델 해석에 의한 암석의 변형과 파괴, 서울대학교, 석사학위논문, 95p.
- Kaiser, E. J., 1950, A study of acoustic phenomena in tensile test. Doctoral Thesis, Technische Hochschule München.
- Bassim, M. N., 1992, Detection of Fatigue Crack Propagation with Acoustic Emission, NDT & E International, Vol. 24, No. 6, pp. 287-289.
- Seto, M., Nag, D. K. and Vutukuri, V. S., 1999, In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis, Geotechnical and Geological Engineering, 17, pp. 241-266.
- Lavrov, A., 2001, Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates, Mechanics of Materials, 33, pp. 669-677.
- Shkuratnik, V. L., Filimonov, Yu. L. and Kuchurin, S. V., 2006, Acoustic emission memory effect in coal samples under uniaxial cyclic loading, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 47, No. 2, pp. 236-240.
- Villaescusa, E., Seto, M. and Baird, G., 2002, Stress measurement from oriented core, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39, pp. 603-615 .
- Villaescusa, E., C.R. Windsor, G. Baird and M. Seto, 2003. Experimental verification of the Acoustic Emission technique of in-situ rock stress tensor measurement, 3rd Int. Symp. on Rock Stress, Kumamoto University, Japan, 395-402, Sugawara, Obara & Sato (Editors), Balkema.
- James, W. D. and William, F. R., 1978, Experimental Stress Analysis, United States of America, McGraw-Hill Inc., pp.571